

中性子ラジオグラフィを用いたセメント硬化体中の含有水量の定量的評価

茨城大学 正会員 ○舟川 勲 正会員 沼尾達弥 手島直之
 京都大学 川端祐司 齊藤泰司
 理化学研究所 広田克也 森田晋也

1. はじめに

中性子ラジオグラフィとは、中性子が物質を透過する際に原子核と中性子の相互作用により生じる減衰特性を利用した非破壊可視化技術である。中性子は物質内の元素や分子、試料の密度や厚さを因子として減衰するが、特に水素に対しては強い吸収・散乱の作用を示すため、水分存在状況の測定に適している [1]。

本研究では、中性子ラジオグラフィによる既往の実験[2]から得られた水の質量減衰係数値を用いて、恒温恒湿環境下における、セメント硬化体の乾燥による水分逸散について、含有水量（自由水）および含有水率の定量的評価を試み、その妥当性を検討した。なお、本研究は平成 23 年度京都大学原子炉実験所共同利用研究による成果である。

2. 実験概要

2.1 中性子ラジオグラフィ概要

本研究における中性子ラジオグラフィの測定は京都大学原子炉実験所, KUR E2 ポート内にて実施した。装置の諸元を表 1 に示す。

2.2 実験方法

本研究では、セメント硬化体の水分乾燥過程において時々刻々と変化する含有水量を中性子強度から定量化する手法を検討した。また、同環境条件下において、同時に重量測定、体積変化を測定し、本手法の妥当性を検討する。測定システムの概要を図 1 に示す。計測方法は、水分逸散量は中性子ラジオグラフィによる撮影および電子天秤による重量測定、乾燥収縮量は接触型の変位計を用いて行う。また、実験水準を表 2 に示す。試験体は図 2 に示すように W/C=30, 40%の薄肉円筒試験体（厚さ約 1mm, 長さ 100mm, 外径 15mm のペースト硬化体）を用いた。試験体は普通ポルトラセメントを用いて作製し、打設 24 時間経過後に水中養生を行い、材齢 28 日後以降に実験に使用した。中性子ラジオグラフィによる測定では、アルミチャンバー内に試験体を設置し、前方向より中性子を照射し、CCD

表 1 中性子ラジオグラフィ装置の諸元

中性子束	3.2×10 ⁵ (n/cm ² ·sec)
コリメーション比 L/D	100
Cd 比	400
n/γ 比	1.1×10 ⁶ (n/cm ² · mR)
コンバータ	蛍光コンバータ (⁶ LiF/ZnS : Ag)
冷却型 CCD カメラ画素数	2048×2048pixel (16bit)
空間解像能	80~100μm/pixel 程度
レンズ	85mm
原子炉出力(MW)	1
画像取得ソフト	理研システム
撮影時間 (秒/枚)	30

表 2 実験水準

薄肉円筒試験体の緒元	W/C (%)	30, 40
	形状 (mm)	高さ:100, 厚さ:1, 外径 15
	使用セメント	普通ポルトランドセメント
各測定に使用する試験体数	中性子照射	30% 1 本, 40% 1 本 ※コンバータとの距離 : 3cm
	重量測定	30% 1 本
	乾燥収縮量測定	30% 2 本, 40% 2 本
実験環境温湿度	25°C, RH55%	

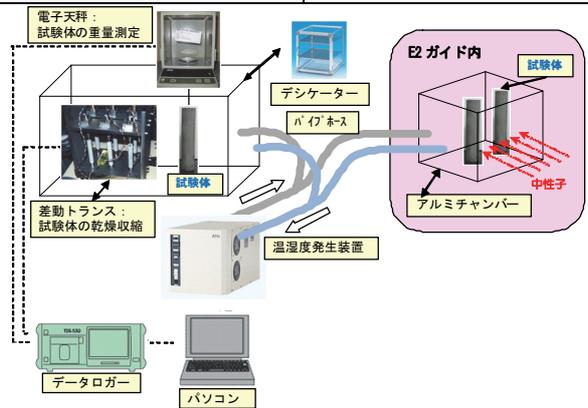


図 1 測定システムの概要

カメラにより透過画像を取得する。それと同時にデシケーター内にて収縮量および重量を測定する。なお、恒温恒湿装置からパイプを通して、アルミ製チャンバー、デシケーターの空気を恒温高湿状態（25°C, RH55%）にて循環させた。試験体とコンバータの距離は 3cm である。

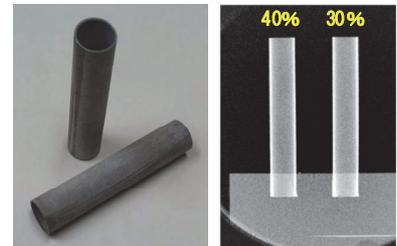


図 2 薄肉円筒試験体

図 3 試験体の透過画像

3. 実験結果および考察

中性子ラジオグラフィによる薄肉円筒試験体の透過画像を図3に示す。W/C=30%, 40%の試験体側面方向における水分の減衰曲線を図4に示す。縦軸は中性子強度、横軸は試験体の測定位置(幅)を表している。この図には、試験開始直後(0時間)と水分逸散が収束近い試験終了付近(521時間後)での比較を示した。水セメント比ごとの比較では、W/C=40%, 30%の順で、水分の減衰率が大きくなっていることがわかる。また、同じ飽和および乾燥状態の比較においても、W/C=30%のセメント硬化体と比較して、当初から多くの水分を保有するW/C=40%の試験体が大きな減衰率となっていることが明確に表れている。

また、W/C=30%の試験体について、電子天秤によって測定したセメント硬化体中の水分逸散量(重量法)と中性子ラジオグラフィによる手法により得られた水分量との比較検討を行った。なお、中性子ラジオグラフィでの撮影では、試験体とコンバータの距離が3cmのため、中性子散乱等の影響を受けない距離である10cmまで割り戻す必要がある。そこで、既往の実験[2]で得られた結果の10cmにおける水の質量減衰係数 $\lambda_w = 3.0154 \text{ (cm}^2/\text{g)}$ を用いた。質量減衰係数は物質の固有の値であり、試験体の厚さが変化しないとすれば、単位体積当たりの含有水分の変化量(逸散重量) $\Delta\rho_w$ (=ペースト中の水のかさ密度 $\text{(g/cm}^3\text{)})$ を算出可能である。 $\Delta\rho_w$ は式(1)のようになる。

$$\Delta\rho_w = \frac{\Delta P_w}{\lambda_w \delta_w} \tag{1}$$

ここで、 ΔP_w : 減衰率の変化量(時刻 $t=0$ 時間と時刻 t 時間の差分), λ_w : 水の質量減衰係数 $\text{(cm}^2/\text{g)}$, δ_w : 水のかさ厚さ (cm)

また、式(2)により、含有水率を表すことができる。ここでいう含有水率とは、セメント硬化体中の空隙部分における自由水の含有量を定義したものである。

$$M = \left(\frac{\rho_w - \Delta\rho_w}{\rho_w} \right) \times 100 \tag{2}$$

ここで M : 含有水率(%), ρ_w : 自由水の飽和状態でのかさ密度水量 $\text{(g/cm}^3\text{)}$

$\Delta\rho_w$ を図5にプロットしてみると、初期の段階では重量法で得た水分逸散曲線とよく一致していることがわかる。しかし、実験終了時間付近では、測定系の補正処理ができず、同様な傾向を示しているが完全には一致していなかった。W/C=30%における乾燥収縮ひずみと含有水率の関係を図6に示す。実験では含有水率

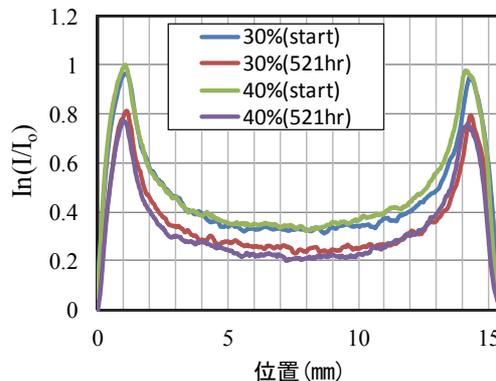


図4 セメント硬化体中の水分(自由水)の減衰曲線

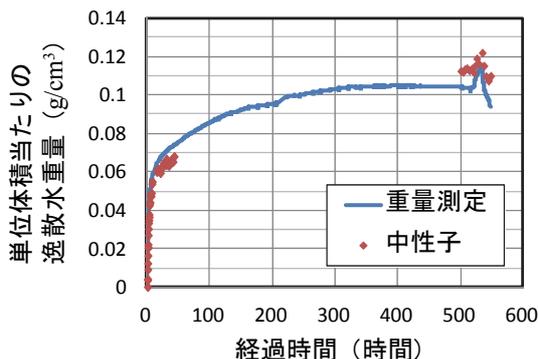


図5 重量測定と中性子ラジオグラフィより算出した単位体積あたりの水分逸散重量の経時変化比較(W/C=30%)

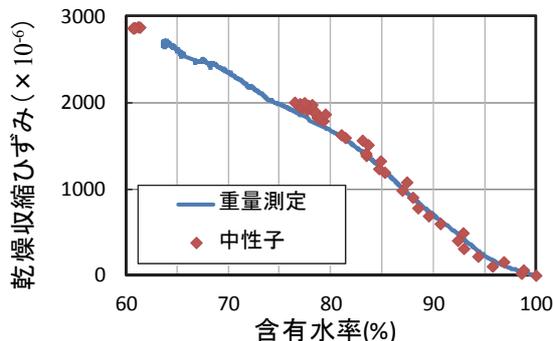


図6 乾燥収縮ひずみと含有水率の関係(W/C=30%)

が約80%を境に勾配が異なっていたが、重量逸散が少なくなった以降も収縮ひずみは増大していることが伺える。

4. おわりに

セメント硬化体の乾燥過程における試験体内の含有水量について、実験で得られた水の質量減衰係数の実験式を用いて算出した水分量と、重量法による逸散水分量では、一致の傾向が得られた。中性子ラジオグラフィは水分量の定量化を可能にすると考えられる。

参考文献

[1] 舟川 勲、沼尾達弥、飯倉 寛：中性子ラジオグラフィを用いたセメント硬化体中の水分評価に関する基礎的研究、土木学会論文集E2、Vol. 67, No. 4, pp.596-604, 2011.11
 [2] 舟川 勲：中性子ラジオグラフィを用いたセメント硬化体中の水分挙動に関する研究、博士学位論文、茨城大学、平成24年3月